



Kunststoffe: High-tech Materialien für Wasserstofftechnologien / *Plastics: High-tech materials for hydrogen technologies*

NETZWERK / NETWORK

Aufbau einer einheitlichen Wasserstoff-Forschungsinfrastruktur /
Establishment of a uniform hydrogen research infrastructure

FORSCHUNG / RESEARCH

Optimierung leitfähiger Kunststoffcompounds
für Wasserstoff-Brennstoffzellen / *IKV researches synergy effects
between plastics technology and biotechnology*

H₂ WERTSCHÖPFUNGSKETTE / H₂ VALUE CHAIN

Kunststoffe als Enabler für eine effiziente Wasserstoffwirtschaft /
Plastics as an enabler for an efficient hydrogen economy



**INSTITUT FÜR
KUNSTSTOFF
VERARBEITUNG**

in Industrie und Handwerk
an der RWTH Aachen



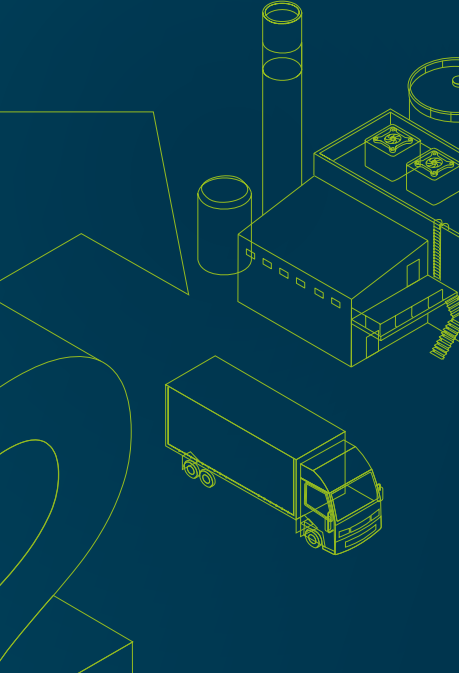
Zukunftstechnologie Wasserstoff – ohne Kunststoffe geht es nicht / *Hydrogen as a technology of the future – plastics are indispensable*

Kaum ein anderes Thema beeinflusst den aktuellen gesellschaftlichen Diskurs so stark wie der umweltbewusste Umgang mit Ressourcen. Wasserstoff stellt in diesem Zusammenhang eine Alternative zu fossilen Brenn- und Rohstoffen dar und wird in verschiedenen Industrien und Anwendungen bereits eingesetzt.

Im Sinne der Nachhaltigkeit muss dabei die Produktion und Verwendung des sogenannten „grünen“ Wasserstoffs angestrebt werden, der aus erneuerbaren Quellen wie Solar- oder Windenergie gewonnen wird. Nur so lässt sich die Wasserstoffgewinnung klimaneutral gestalten.

Hardly any other topic is exerting such an influence on current social discourse as the environmentally aware use of resources. In this context, hydrogen represents an alternative to fossil fuels and raw materials, and is already being used in various industries and applications.

In terms of sustainability, the aim must be to further increase the production and use of so-called “green” hydrogen, which comes from renewable sources such as solar or wind energy. This is the only way to make hydrogen production climate-neutral.



Ein prominentes Beispiel für die Verwendung von Wasserstoff ist die Stromerzeugung in Brennstoffzellen (s. Seite 16). Ein großer Vorteil: Wenn die chemische Energie aus der Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt wird, entsteht Wasser als Abfallprodukt, keine schädlichen Emissionen. In zahlreichen anderen Anwendungen wird der Wasserstoff direkt verbrannt oder beispielsweise in Kohlenwasserstoff als synthetischen Kraftstoff umgewandelt, hierbei kann die Verwendung von CO₂ aus treibhausgasintensiven Prozessen direkt und indirekt für eine CO₂-Reduktion sorgen. Großes Potenzial für die Reduzierung von CO₂ besteht darüber hinaus in der Stahlerzeugung, wo Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt wird und damit die Verbrennung von Kohle überflüssig machen könnte.

Wasserstoffspeicherung als Ergänzung zur Ökostromnutzung

Im Sinne der Nachhaltigkeit sollte Wasserstoff als Energieträger vorzugsweise dort eingesetzt werden, wo die direkte Nutzung von Ökostrom nicht möglich ist. Der Grund dafür ist, dass die Erzeugung von Wasserstoff immer mit Verlusten einhergeht und somit die Effizienz der Kette aus Stromerzeugung, Elektrolyse und Umwandlung des Wasserstoffs in Energie geringer ist als bei der direkten Nutzung von Strom aus regenerativen Quellen.

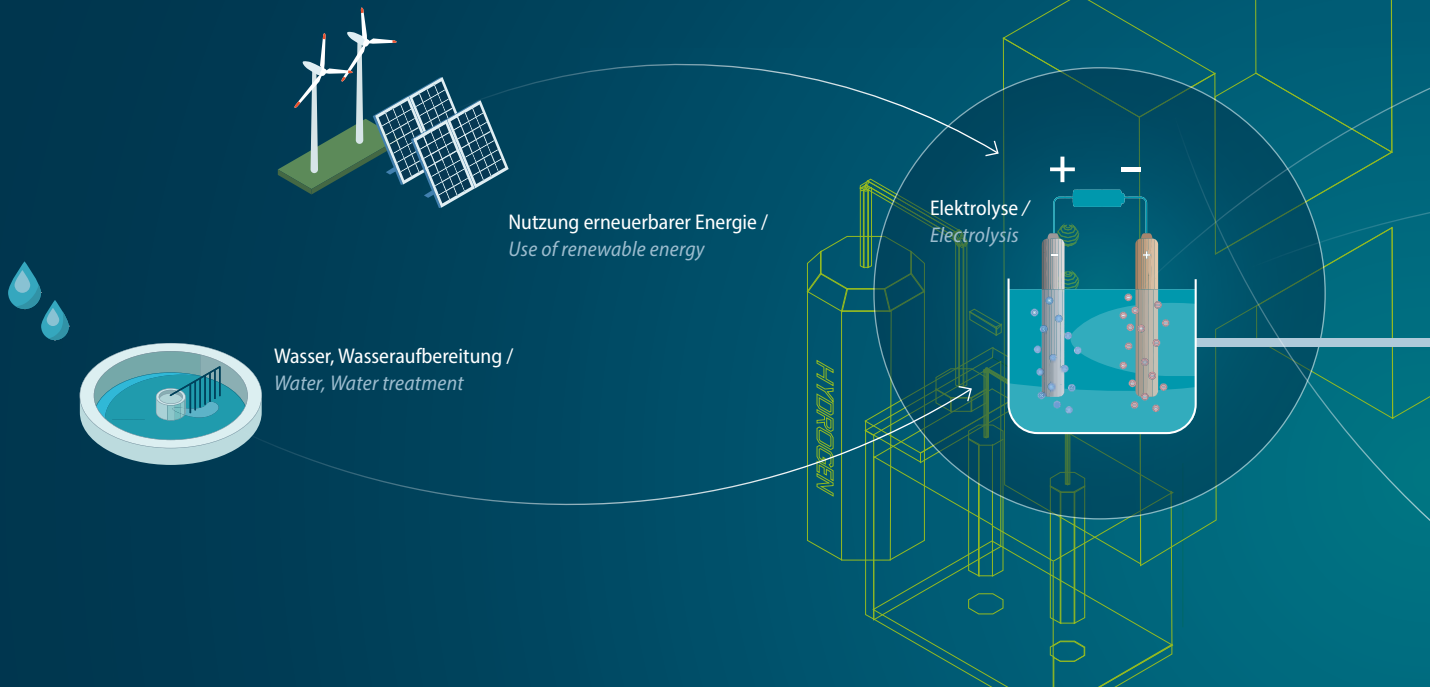
Im Automobil ist auch aufgrund des höheren Wirkungsgrads die Batterie bis heute als Speicher etabliert. Allerdings ist bei großen Vehikeln wie Bussen, LKWs, Schienenfahrzeugen oder auch in der Schifffahrt der Wasserstoffantrieb ein hochrelevantes Feld. Denn gleich zwei Gründe sprechen hier gegen den Einsatz von Batterien: Erstens könnten schwerlastige Fahrzeuge nur mit einem sehr hohen Zusatzgewicht elektrifiziert und damit CO₂-neutral betrieben werden, zweitens würde die geringe Reichweite der Elektromotoren den Langstreckenverkehr enorm behindern.



Oben: Mit wasserstoffbasierter Brennstoffzellentechnologie angetriebener LKW und Detailansicht eines Druckspeichersystems in einem Bus mit Wasserstoffantrieb / Above: Truck powered by hydrogen based fuel cell technology and detail of a pressure storage system in a hydrogen driven bus | Photos: NPROXX/Adobe Stock

A prominent example of the use of hydrogen is electricity generation in fuel cells (see page 16). A major advantage is that when the energy from the reaction of hydrogen and oxygen is released, water is produced as a waste product with no harmful emissions. In numerous other applications, the hydrogen is burned directly or converted, for example, into hydrocarbon as a synthetic fuel. In this case, the use of CO₂ from greenhouse gas-intensive processes can ensure a reduction of CO₂, both directly and indirectly. There is also great potential for reducing CO₂ in steel production, where hydrogen could be used as a reducing agent and thus make the combustion of coal superfluous.

Die Wertschöpfungskette des Wasserstoffs / *The hydrogen value chain*



Kunststoffe spielen bei der Entstehung einer Wasserstoffwirtschaft eine große Rolle, sowohl im Hinblick auf eine flächendeckende Umsetzung der neuen Technologien als auch in Bezug auf eine Steigerung der Kosten- und Energieeffizienz.

Kunststoffe als Enabler für eine effiziente Wasserstoffwirtschaft

Aufgrund des hohen Drucks, die gesteckten Klimaziele zu erreichen, sind Wasserstofftechnologien inzwischen international von enormer ökologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Für Deutschland sind die Handlungsfelder in der 2020 veröffentlichten nationalen Wasserstoffstrategie dokumentiert.

Kunststoffe werden in jedem Abschnitt der Wasserstoff-Wertschöpfungskette benötigt: bei der Erzeugung, für die Speicherung und den Transport sowie in der Nutzung (s. oben). Grund genug, das Thema Wasserstofftechnologie aus einer ganzheitlichen Perspektive zu betrachten und zu erforschen.

Hydrogen storage as a complement to the use of green electricity

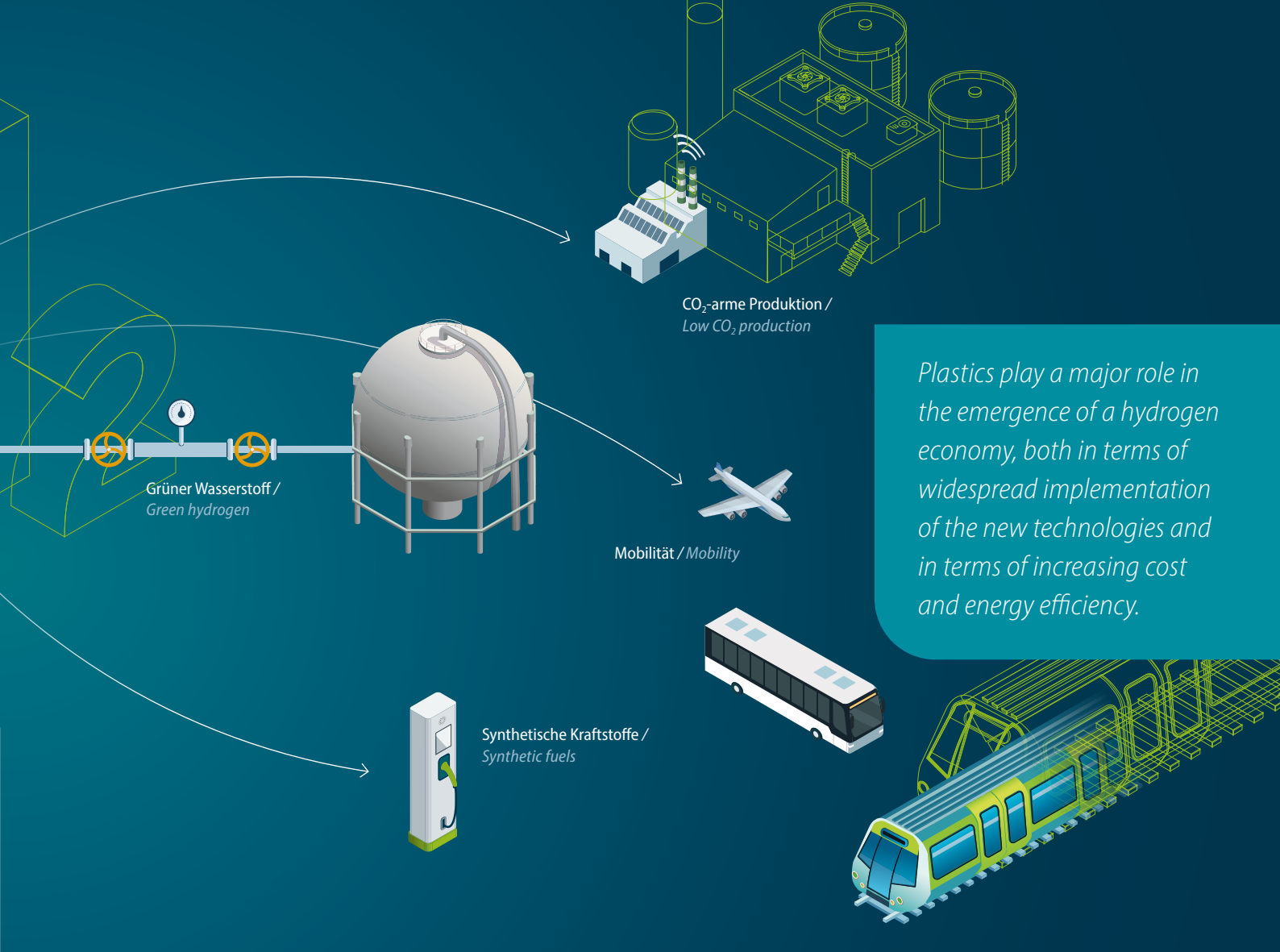
In terms of sustainability, hydrogen should preferably be used as an energy carrier where the direct use of green electricity is not possible. The reason for this is that the production of hydrogen always involves losses, and the efficiency of the chain of electricity generation, electrolysis and conversion of the hydrogen into energy is therefore lower than with the direct use of electricity from renewable sources.

In automobiles, the battery is currently established as a storage device, also because of its higher efficiency. Nevertheless, hydrogen propulsion is of considerable importance for large vehicles such as buses, trucks, rail vehicles or even in shipping. There are two reasons why batteries cannot be used here: Firstly, vehicles with heavy loads could only be electrified with a very high additional weight and thus operated in a CO₂-neutral manner. Secondly, their limited range would be an enormous hindrance to long-distance traffic.

Plastics as an enabler for an efficient hydrogen economy

Due to the high pressure being imposed to achieve the set climate targets, hydrogen technologies are now of enormous ecological, social and economic importance internationally. For Germany, the fields of action are documented in the national hydrogen strategy published in 2020.

Plastics are needed at every stage of the hydrogen value chain: in production, for storage and transport, and in use (s. above). This is reason enough to look at and research the topic of hydrogen technology from a holistic perspective.

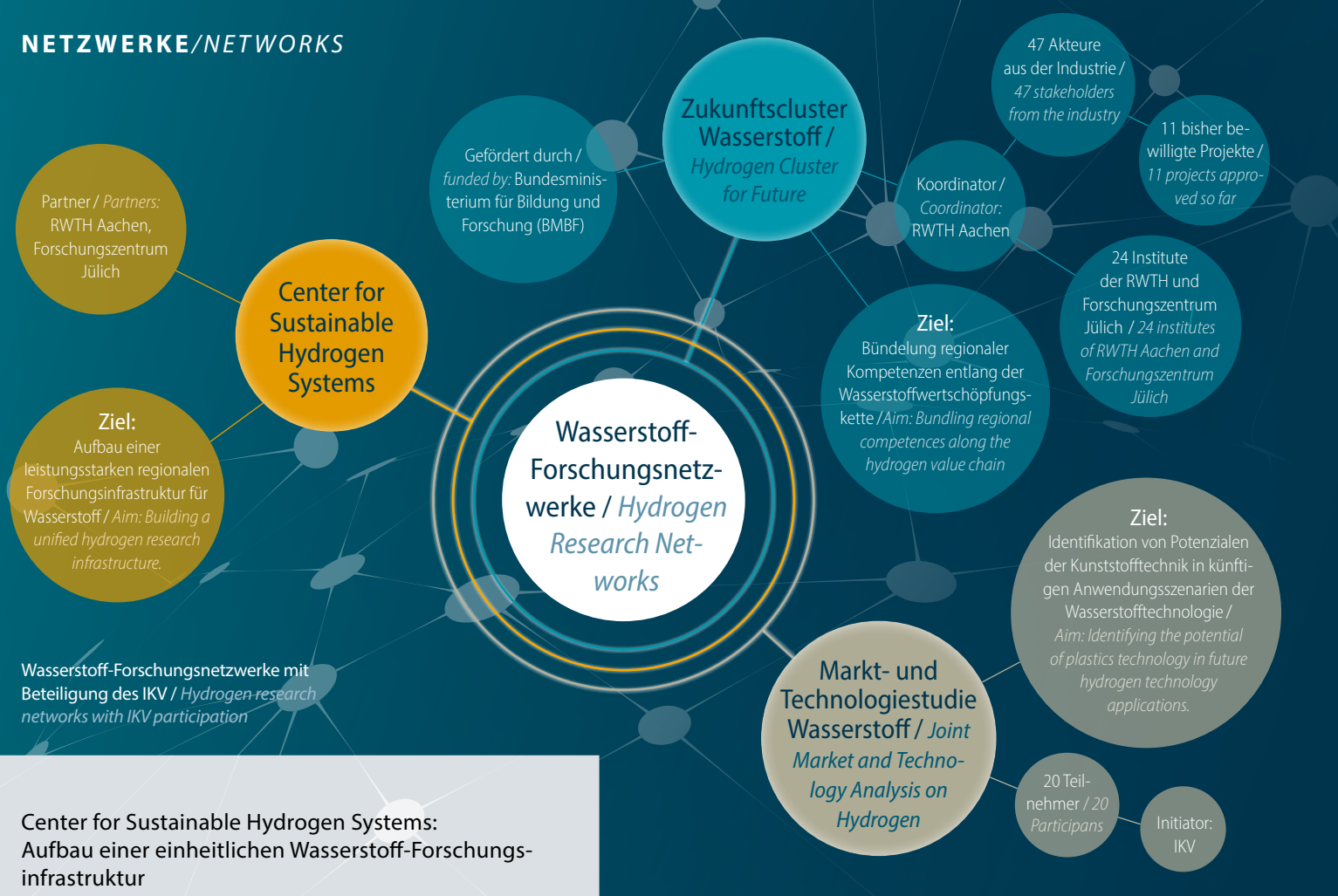


Hoher Vernetzungsgrad und Expertise für die Entwicklung von Wasserstoffsystemen

High degree of networking and expertise for the development of hydrogen systems

Das IKV hat sich in der jüngeren Vergangenheit bereits in verschiedenen Forschungsprojekten mit der Entwicklung von Komponenten für Brennstoffzellen und mit der Speicherung von Wasserstoff in CFK-Druckbehältern beschäftigt (s. Seite 12). Doch aufgrund der Dimension des Gesamtthemas – Wasserstoff gilt weltweit als Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Klimaziele – sucht die aktuelle Forschung am IKV gezielt Synergien und ist stark eingebettet in Aktivitäten der RWTH Aachen und weiterer Partner. – etwa als Mitglied des Centers for Sustainable Hydrogen Systems, als vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderter Partner im Rahmen des Zukunftsclusters Wasserstoff oder als Initiator einer mit 20 Industriepartnern durchgeführten Technologiestudie zur Identifikation neuer Potenziale von Kunststoffen in der Wasserstoffwirtschaft.

In the recent past, IKV has already been involved in various research projects on the development of components for fuel cells and the storage of hydrogen in CFRP pressure vessels (s. page 12). However, due to the dimension of the overall topic – hydrogen is regarded worldwide as a key technology for achieving climate goals – current research at IKV is specifically seeking synergies and is being deeply embedded in activities of RWTH Aachen University and other partners – for example, as a member of the Centre for Sustainable Hydrogen Systems, as a partner funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) within the framework of the Future Cluster Hydrogen, or as the initiator of a technology study conducted with 20 industrial partners to identify new potential for plastics in the hydrogen economy.



Center for Sustainable Hydrogen Systems: Aufbau einer einheitlichen Wasserstoff-Forschungsinfrastruktur

Um die Forschung in der Region Aachen rund um das Thema Wasserstoff zu bündeln, wurde im Frühjahr 2021 das Center for Sustainable Hydrogen Systems gegründet. Auf dem Kick-off-Workshop trafen sich mehr als 50 Professoren der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich und präsentierten ihre Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Thema. Das Konsortium verständigte sich auf die gemeinsame Vision einer einheitlichen Wasserstoff-Forschungsinfrastruktur mit dem Ziel, den Raum Aachen zu einer führenden Wasserstoffregion zu machen. Dabei soll zunächst der Campus Melaten und eine dort zu errichtende Wasserstoffinfrastruktur als Blaupause für eine innovative Wasserstoffwirtschaft genutzt werden. Das Center dient insbesondere der Vernetzung der Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, die sich in Aachen und Jülich mit Wasserstofftechnologien beschäftigen.

Zukunftskuster Wasserstoff: „Innovation Valley der Wasserstofftechnologien“

Das Zukunftskuster Wasserstoff ist eines von sieben regionalen Innovationsnetzwerken, die sich beim Ideenwettbewerb „Clusters4Future“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) als Gewinner durchsetzen konnten. Das von der RWTH Aachen koordinierte Projekt soll die bereits bestehende hohe Expertise im Bereich der Wasserstofftechnologien im Raum Aachen und Jülich bündeln sowie die regionalen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Ressource Wasserstoff vorantreiben: von der Erzeugung, über die

Centre for Sustainable Hydrogen Systems: Establishment of a uniform hydrogen research infrastructure

The Centre for Sustainable Hydrogen Systems was founded in spring 2021 to bundle research in the Aachen region on the topic of hydrogen. More than 50 professors from RWTH Aachen University and the Jülich Research Centre met at the kick-off workshop and presented their research and development projects on the topic. The consortium agreed on the joint vision of a unified hydrogen research infrastructure with the aim of making the Aachen region a leading hydrogen region. The Centre serves in particular to promote networking between scientists working on hydrogen technologies in Aachen and Jülich.

Hydrogen Cluster for future: “Innovation Valley of hydrogen technologies”

The Hydrogen Cluster for Future is one of seven regional innovation networks that won the “Clusters4Future” ideas competition organised by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The project, coordinated by RWTH Aachen University, is intended to pool the already existing high level of expertise in the field of hydrogen technologies in the Aachen and Jülich regions, and to promote regional research and development activities along the entire value-added chain of hydrogen as a resource: from production, storage and distribution to utilisation. The joint research pursues an interdisciplinary approach, i. e. the objectives and effectiveness of concrete projects are based on technological, economic and social networking. The Hydrogen Cluster for Future is funded by the BMBF with up to 45 million euros.

Speicherung und Verteilung bis hin zur Nutzung. Die gemeinsame Forschung verfolgt dabei einen interdisziplinären Ansatz, d. h. die Zielsetzung und Wirksamkeit konkreter Projekte basieren auf technologischer, wirtschaftlicher und sozialer Vernetzung. Das Zukunftscluster Wasserstoff wird vom BMBF mit bis zu 45 Millionen Euro gefördert.

Als Projektpartner arbeitet das IKV aktiv am Aufbau des Netzwerkes mit: 24 Forschungsinstitute der RWTH Aachen und des Forschungszentrums Jülich, ein Beirat aus 16 Institutionen und Unternehmen sowie 47 weitere Forschungspartner aus ganz Deutschland vereinen im Cluster ihr Know-How zur Erforschung von Wasserstofftechnologien.

Markt- und Technologiestudie Wasserstoff: Potenziale einer Zukunftstechnologie für die Kunststoffindustrie

Im Rahmen einer gemeinsamen Technologieanalyse mit 20 Industriepartnern arbeitet das IKV aktuell an der Identifikation von Potenzialen zur Verbesserung bestehender Anwendungen von Kunststoffen. Auch völlig neue Einsatzgebiete in den Systemen zur Erzeugung und Speicherung, zum Transport und zur Umwandlung von Wasserstoff sollen ermittelt und offengelegt werden. Die Ergebnisse der im Oktober 2021 gestarteten Studie werden wichtige Impulse für die Entwicklung, Qualifizierung und Produktion von effizienteren Systemen für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Wasserstoffwirtschaft geben.

Beim Kickoff Meeting der Projektpartner im September 2021 präsentierten die Unternehmen 3M Deutschland, AGC Chemicals, ALLOD Werkstoff, BASF, Brabender, Covestro, EBG Group, Freudenberg, Getzner Werkstoffe, HUEHOCO, Klöckner DESMA Elastomertechnik, LANXESS, MOCOM Compounds, TECE, WILO und Yizumi wertvolle Impulsvorträge, die die jeweiligen Erfahrungen im Bereich Wasserstoff aufzeigten und konkrete Erwartungshaltungen an das Projekt benannten. In der aktuellen Projektphase treffen sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zu themenspezifischen Workshops wie z. B. zum Thema „Märkte und Anforderungen“. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, dem Netzwerk beizutreten und an der Ausrichtung des Projekts mitzuwirken (s. Seite 14/15).

Folgende Unternehmen beteiligen sich bisher an dem Projekt:
The following companies are participating in the project so far:

AGC Chemicals Europe Ltd. | AirLiquide | ALLOD Werkstoff GmbH & Co. KG | Brabender GmbH & Co. KG | Covestro Deutschland AG | EBG group GmbH | Engel Austria GmbH | Evonik Operations GmbH | Georg Fischer Rohrleitungssysteme AG | Getzner Werkstoffe GmbH | HUEHOCO Group Holding GmbH & Co. KG | KLÖCKNER DESMA Elastomertechnik GmbH | Kurtz GmbH | LANXESS Deutschland GmbH | 3M Deutschland GmbH | MOCOM Compounds GmbH & Co. KG | Robert Bosch GmbH | Wilo SE | Yizumi Precision Machinery Co. Ltd. |

As a project partner, IKV is actively involved in setting up the network: 24 research institutes of RWTH Aachen University and Jülich Research Centre, together with an advisory board of 16 industrial partners and 47 other research partners from all over Germany, are pooling their know-how in the cluster to research hydrogen technologies.

Market and Technology Study Hydrogen: Potentials of a future technology for the plastics industry

As part of a joint technology analysis with 20 industrial partners, IKV is currently working on identifying potential for improving existing applications of plastics. Completely new areas of application in the systems for the production and storage, transport and conversion of hydrogen are also to be identified and disclosed. The results of the study, which was launched in October 2021, will provide important impetus for the development, qualification and production of more efficient systems for a competitive and sustainable hydrogen economy.

At the kick-off meeting of the project partners in September 2021, the companies 3M Deutschland, AGC Chemicals, ALLOD Werkstoff, BASF, Brabender, Covestro, EBG Group, Freudenberg, Getzner Werkstoffe, HUEHOCO, Klöckner DESMA Elastomertechnik, LANXESS, MOCOM Compounds, TECE, WILO and Yizumi presented valuable keynote speeches that highlighted their respective experiences in the field of hydrogen. They also cited their specific expectations for the project. In the current project phase, the participants are meeting for topic-specific workshops, for example on the topic of "Markets and Requirements". It is still possible to join the network and participate in the orientation of the project (see page 14/15).

Ansprechpartner zum Thema Wasserstoff- Netzwerke / Contact on the subject of the hydrogen networks:

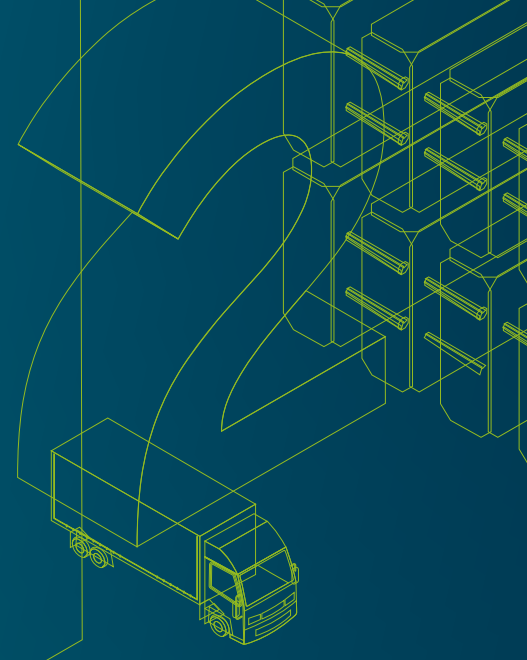
Dr.-Ing. Kai Fischer
Wissenschaftlicher Direktor / Scientific Director

Dominik Förger, M.Sc.
Leiter der Abteilung Faserverstärkte
Kunststoffe und Polyurethane / Head of the Department
Composites and Polurethanes

H2@ikv.rwth-aachen.de

Wasserstoff-Druckspeicher – effiziente Produktion und Auslegung

Hydrogen pressure storage – efficient production and design



Zur Marktdurchdringung von brennstoffzellenbasierten Antriebssystemen kommt der effizienten Speicherung von Wasserstoff eine hohe Bedeutung zu – die dafür genutzten Druckbehälter sind relevante Kostentreiber des Gesamtfahrzeugs. Möglichkeiten, die Kosten von Typ-IV-Druckbehältern zu optimieren, liegen in der Auslegung (Steigerung des Materialausnutzungsgrades), der Herstellung (Vermeidung prozessinduzierter Fehlstellen und Ausschussreduktion) sowie der Inspektion (Entwicklung von Methoden zur Wartung ohne Behälterausbau).

Das IKV forscht in verschiedenen Projekten an technologischen Fragestellungen, die brennstoffzellenbasierte Antriebssysteme konkurrenzfähiger machen sollen. In dem vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMVI) geförderten Verbundprojekt DELFIN wird eine Kosten- und Gewichtsreduktion von Typ-IV-Druckbehältern durch Optimierung der strukturmechanischen Auslegung und der Fertigungsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette angestrebt.

Digitales Inline-Messsystem für verbesserte Behälterqualität

Das IKV entwickelte im Rahmen des Forschungsprojekts eine kamerabasierte Messmethodik und angepasste Bildverarbeitungsalgorithmen zur Inline-Überwachung des Wickelprozesses. Damit werden prozesseitige Abweichungen der Faserbandablage erfasst und für die realitätsnahe Abbildung der Druckbehälter in Form eines Digitalen Zwillings mit orts aufgelöster Angabe von Qualitätsparametern genutzt. Die Messmethodik wird auf einer innovativen roboterbasierten Wickelanlage an einem Typ-IV-Druckbehälter validiert und erweitert das Verständnis über Einflüsse der Prozessparameter auf die Faserbandgeometrie (Breite, Position, Orientierung) und damit auf die Behälterqualität.

For the market penetration of fuel cell-based drive systems, the efficient storage of hydrogen is of great importance – the pressure vessels used for this purpose are very relevant as cost drivers for the vehicle as a whole. Possibilities for optimising the costs of type IV pressure vessels lie in the design (increasing the degree of material utilisation), manufacture (avoiding process-induced defects and reducing rejects), and inspection (developing methods for maintenance without removing the vessel).

IKV is conducting research in various projects on technological issues that aim to make fuel cell-based drive systems more competitive. In the DELFIN joint project funded by the Federal Ministry for Digital and Transport (BMVI), the aim is to reduce the costs and weight of type IV pressure vessels by optimising the structural-mechanical design and the manufacturing processes along the entire value chain.

Digital inline measuring system for improving the quality of the pressure vessels

As part of the research project, IKV has developed a camera-based measurement methodology and adapted image processing





Oben: Stapel mit Druckbehältern und Detailansicht der Wickelanlage mit Legekopf / Above: Stack with pressure vessels and detailed view of the winding unit with laying head | Photos: NPROXX/IKV/Fröls

Im System haben sich insbesondere Infrarotkameras als geeignet erwiesen: Der Kontrast in der Bildaufnahme wird durch den Temperaturunterschied zwischen einlaufendem, warmem Faserband und dem bereits abgekühlten Untergrund erzeugt. Mit dieser Methodik kann die Faserbandbreite erstmals im laufenden Prozess in Abhängigkeit der Prozessparameter und der Beschaffenheit der Wickelkörperoberfläche quantitativ bestimmt werden.

Für den Anwender ergibt sich daraus das Potenzial einer präziseren simulativen Untersuchung des Behälterverhaltens durch Kenntnis der realen Faserbandgeometrie sowie der Homogenisierung des Laminataufbaus und der Materialeigenschaften durch Sicherstellung einer Band-an-Band-Ablage in unterschiedlichen Prozesssituationen.

Mechanisches und thermisches Verhalten der Behältermaterialien

Vor dem projektübergreifenden Ziel einer Material- und Kosteneinsparung – unter anderem durch eine verbesserte Behälterauslegung – führten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IKV auch simulative Untersuchungen zum mechanischen und thermischen Verhalten der Behältermaterialien und deren Schnittstellen unter realitätsnaher zyklischer Druckbelastung durch. Dazu wurde eine physikalisch basierte null- und eindimensionale Simulationsmethodik zur Berechnung der Temperaturentwicklung in Typ-IV-Druckbehältern mit einer optionalen Ein- bzw. Zweivegekopplung mit struk-

Unten: Infrarotkamera zur Inline-Ermittlung der Faserbandbreite bei der Ablage von Umfangswicklungen auf einem Typ-IV-Druckbehälter./ Below: Infrared camera for inline determination of the fibre bandwidth when depositing circumferential windings on a type IV pressure vessel | Photos: IKV/Fröls

algorithms for inline monitoring of the winding process. With this, process-related deviations in the band deposition are recorded and used for realistic imaging of the pressure vessels in the form of a digital twin with spatially resolved indication of quality parameters. The measurement methodology is validated on an innovative robot-based winding system on a type IV pressure vessel. It extends the understanding of the influences of the process parameters on the band geometry (width, position, orientation) and thus on the vessel quality.



Links: Gesamtansicht der Anlage für das Nass- und Towpreg-Wickeln im FVK-Technikum / Left: General view of the wet and towpreg winding line in the FRP technical centre. | Photo: IKV/Fröls





turmechanischen Finite-Elemente-Modellen entwickelt. Sie beruht auf lediglich zwei Modellparametern und berücksichtigt das Realgasverhalten.

Die gemeinsame Untersuchung von mechanischem und thermischem Verhalten ist bei Materialien in Wasserstoffspeichersystemen besonders relevant, da es, nach projektinternen Untersuchungen, beim Betanken in einzelnen Behälterbereichen zu deutlichen Temperaturschwankungen zwischen -17 °C und $+73\text{ °C}$ kommen kann. Die Verifizierung des Modells erfolgte über CFD-Berechnungen und NAFEMS-Benchmark-Tests sowie eine Validierung mittels experimenteller Daten (räumlich gemittelte Gastemperatur, Wandtemperatur, Außentemperatur der Behälteroberfläche, Massestrom Gas). Insgesamt ist durch die im Projekt erlangten Erkenntnisse des IKV und des Konsortiums eine Kosten- und Gewichtsersparnis von Typ-IV-Druckbehältern um jeweils 15 Prozent als realistisch einzuschätzen.

Integration von Sensorfasern im Verbundprojekt HylInnoTank

Darüber hinaus ist das IKV im Rahmen des Zukunftsclusters Wasserstoff im Verbundprojekt HylInnoTank beteiligt, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Das Ziel des Konsortiums ist es, durch den Einsatz von Sensorfasern zur Dehnungsfeldüberwachung die Kosten von periodischen Wartungen von Typ-IV-Druckbehältern zu senken und eine Aussage über deren Restlebensdauer nach Ablauf der Einsatzzeit von typischerweise 15 bis 20 Jahren treffen zu können. Die Integration von Sensorfasern im Laminat der Druckbehälter bietet das Potenzial zur Prüfung der strukturellen Integrität des Composites ohne Ausbau des Behälters aus der Baugruppe.

Infrared cameras in particular have proved suitable in the system: The contrast in the image recording is generated by the temperature difference between the incoming warm fibre band and the already cooled substrate. With this method, the band width can be quantitatively determined for the first time in the ongoing process as a function of the process parameters and the nature of the winding mandrel surface.

For the user, this offers the potential of a more precise simulation of the vessel behaviour through knowledge of the real band geometry and of the homogenisation of the laminate structure and material properties by ensuring band-to-band deposition in different process situations.

Mechanical and thermal behaviour of the pressure vessel materials

With the cross-project goal of material and cost savings in mind – including improved design – the IKV scientists also conducted simulative investigations into the mechanical and thermal behaviour of the pressure vessel materials and their interfaces under realistic cyclic pressure loads. For this purpose, a physically based zero-dimensional and one-dimensional simulation methodology was developed for calculating the temperature development in type IV pressure vessels with an optional one- or two-way coupling with structural-mechanical finite element models. It is based on only two model parameters and takes into account the real gas behaviour.



Links: Wickelanlage im FVK-Technikum des IKV /
Left: Winding line in IKV's technical centre for FRP
| Photos: IKV/Fröls



The joint investigation of mechanical and thermal behaviour is particularly relevant for materials in hydrogen storage systems, since, according to internal project studies, significant temperature fluctuations of between -17 °C and $+73\text{ °C}$ can occur in individual areas of the vessel during refuelling. The model was verified using CFD calculations and NAFEMS benchmark tests as well as validation using experimental data (spatially averaged gas temperature, wall temperature, external temperature of the container surface, mass flow of gas). Overall, the findings of IKV and the consortium obtained in the project mean that a cost and weight saving of type IV pressure vessels of 15 percent can be considered realistic.

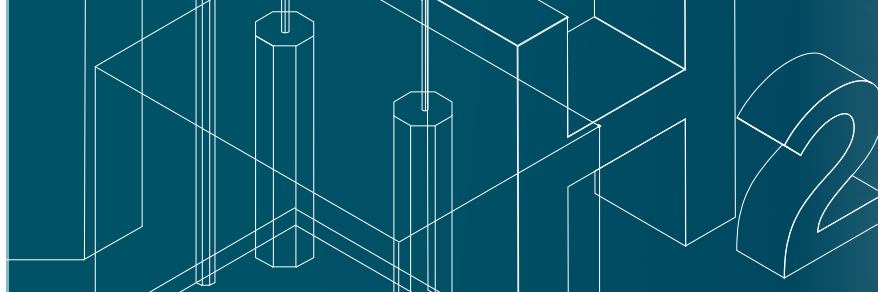
Integration of sensor fibres in the HylInnoTank joint project

In addition, IKV is involved in the HylInnoTank joint project within the framework of the Hydrogen Cluster for Future, which is funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF). The aim of the consortium is to use sensor fibres for strain field monitoring to reduce the costs of periodic maintenance of type IV pressure vessels and to be able to make a statement about their remaining service life after the typical service life of 15 to 20 years has expired. The integration of sensor fibres in the laminate of the pressure vessels offers the potential to test the structural integrity of the composite without removing the vessel from the assembly.

Against this background, IKV is developing a methodology for damage-free and reproducible instrumentation of the pressure vessel laminate with sensor fibres during its production in the wet winding process. A particular challenge here is the nature and positioning of the entry and exit points of the sensor fibres in and out of the laminate, where the fibre is particularly fragile in the face of external influences. Subsequently, IKV will investigate the response behaviour of the sensor technology on the basis of reference and pre-damaged test specimens (for example delaminations, impact damage, pores) in order to lay the foundation for the development of a model for the prediction of residual burst pressure and residual service life.

Vor diesem Hintergrund erarbeitet das IKV eine Methodik zur schädigungsfreien und reproduzierbaren Instrumentierung des Druckbehälterlaminats mit Sensorfasern während der Fertigung im Nasswickelverfahren. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die Beschaffenheit und Positionierung von Ein- bzw. Ausgangspunkten der Sensorfasern in und aus dem Laminat dar, wo die Faser gegenüber äußeren Einflüssen besonders fragil ist. Im Anschluss daran wird das IKV das Antwortverhalten der Sensorik anhand von Referenz- und vorgeschädigten Prüfkörpern (beispielsweise Delaminationen, Impactschäden, Poren) untersuchen, um damit die Grundlage für die Entwicklung eines Modells zur Restberstdruck- und Restlebensdauervorhersage zu legen.





Optimierung leitfähiger Kunststoffcompounds für Wasserstoff-Brennstoffzellen

Optimisation of conductive plastic compounds for hydrogen fuel cells

Im Lebenszyklus von Wasserstoff folgt auf Erzeugung, Speicherung und Transport letztlich die Nutzung des Rohstoffs. In diesem Zusammenhang werden Wasserstoff-Brennstoffzellen eingesetzt, um die chemische Reaktionsenergie des Wasserstoffs in elektrische Energie umzuwandeln. Bipolarplatten, die die Reaktionsmedien (Wasserstoff und Sauerstoff) in der Brennstoffzelle verteilen und die erzeugte Energie abführen, sind ein zentraler Bestandteil von Brennstoffzellenstapeln.

Die wirtschaftliche Herstellung von Bipolarplatten aus elektrisch und thermisch hochleitfähigen Kunststoffen mit serientauglichen Verarbeitungstechnologien wie dem Spritzgießen stellt einen wichtigen Entwicklungstreiber für die Wasserstoffnutzung dar. Dabei spielt die Optimierung der leitfähigen Kunststoffcompounds im Hinblick auf gute Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften eine große Rolle. Die entscheidende Aufgabe der Bipolarplatten ist es, die elektrische Energie mit einem hohen Wirkungsgrad abzuleiten, dies setzt eine hohe elektrische Leitfähigkeit des verwendeten Materials voraus. Entscheidend für den Einsatz in Brennstoffzellen sind daneben eine hohe chemische Beständigkeit des Materials, ein niedriger Materialpreis und Gewichtsvorteile gegenüber korrosionsbeständigen metallischen Werkstoffen.

Grundvoraussetzung für die Compoundierung und Weiterverarbeitung ist ein fundiertes Materialverständnis. Auch Bauteile aus Kunststoffverbunden weisen je nach Form und Herstellungsverfahren oft ausgeprägte anisotrope Eigenschaften auf. Parameter wie Füllstofftyp, Füllstoffmorphologie, Aspektverhältnis und Füllstoffgröße sowie konstruktive Bedingungen wie die Bauteildicke bestimmen die Orientierungseinflüsse, die bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden müssen. Deshalb forschen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des IKV bereits seit längerer Zeit an verschiedenen Aspekten, die eine Optimierung von Bipolarplatten zum Ziel haben, beispielsweise der Anreicherung des Kunststoffs mit Graphit als Füllstoff, um die Leitfähigkeit zu gewährleisten.

In addition to production, storage and transport, the life cycle of hydrogen also includes its use. In this context, hydrogen fuel cells are used to convert the chemical reaction energy of hydrogen into electrical energy. Bipolar plates, which distribute the reaction media (hydrogen and oxygen) in the fuel cell and dissipate the generated energy, are a central component of fuel cell stacks.

The economical production of bipolar plates from electrically and highly thermally conductive plastics with processing technologies suitable for series production, such as injection moulding, represents an important development driver for hydrogen utilisation. The optimisation of the conductive plastic compounds with regard to good processing and usage properties plays a major role here. The key task of the bipolar plates is to dissipate the electrical energy with a high degree of efficiency. This requires high electrical conductivity of the material used. In addition, high chemical resistance of the material, a low material price, as well as weight advantages over corrosion-resistant metallic materials are decisive for their use in fuel cells.

The basic prerequisite for compounding and further processing is a sound understanding of the materials involved. Components made of plastic composites also often exhibit pronounced anisotropic properties, depending on the shape and manufacturing process. Parameters such as filler type, filler morphology, aspect ratio and filler size as well as design conditions such as component thickness determine the orientation influences that must be taken into account in component design. That's why scientists at IKV have been researching various aspects aimed at optimising bipolar plates for some time, such as enriching the plastic with graphite as a filler to ensure conductivity.

High conductivity due to graphite

The graphite filler enables high electrical conductivity and efficient heat transfer in the plastic composite. This property profile makes the combination of the two materials graphite and plastic suitable as a material for bipolar plates.



Hochleitfähig durch Graphit

Der Füllstoff Graphit ermöglicht eine hohe elektrische Leitfähigkeit und einen effizienten Wärmeübergang im Kunststoffverbund, die Kombination der beiden Materialien Graphit und Kunststoff eignet sich durch dieses Eigenschaftsprofil als Material für Bipolarplatten.

Eine Herausforderung für den Einsatz von Graphitverbundwerkstoffen liegt allerdings in dem hohen Füllstoffgehalt, der zur Erreichung der Leitfähigkeit erforderlich ist. Neben den dadurch steigenden Materialkosten wird die Verarbeitung durch die zunehmende Schmelzeviskosität bei höheren Füllstoffgehalten immer anspruchsvoller. Das primäre Ziel ist die Massenproduktion von Bipolarplatten im Spritzgussverfahren: Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Compounds führt zu einer schnelleren Erstarrung der Schmelze durch den Kontakt mit der metallischen Werkzeugoberfläche. Kürzere Fließweglängen und hohe Druckverluste sind die Folge. Hohe Füllgrade führen zu einer hohen Materialsteifigkeit. Gleichzeitig geht ein zunehmender Füllgrad mit einer für die Anwendung unzureichenden Bruchdehnung und Schlagzähigkeit einher.

Diese Herausforderungen lassen sich durch adäquate Maßnahmen meistern: Die mechanischen Eigenschaften von hochgefüllten Graphitverbundwerkstoffen können durch eine Schlagzähmodifikation der Kunststoffmatrix mit einer elastischen Kautschukphase, wie z. B. einem Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), gezielt optimiert werden. Zähigkeitssteigernde Mikroverformungsmechanismen (Rissbildung, Scherverformung etc.) bewirken eine Energiedissipation und können so der Rissbildung entgegenwirken.

However, one challenge for the use of graphite composites lies in the high filler content required to achieve the conductivity. In addition to the resulting increase in material costs, processing becomes more challenging due to the increasing melt viscosity at higher filler contents. The primary goal is the mass production of bipolar plates by injection moulding: the high thermal conductivity of the compound leads to faster solidification of the melt through contact with the metallic mould surface. Shorter flow path lengths and high pressure losses are the result. High filling levels lead to high material stiffness. At the same time, an increasing filling level is accompanied by insufficient elongation at break and impact strength for the application.

These challenges can be overcome by suitable measures: the mechanical properties of highly filled graphite composites can be specifically optimised by impact modification of the plastic matrix with an elastic rubber phase, such as an ethylene propylene diene rubber (EPDM). Toughness-increasing micro-deformation mechanisms (crack formation, shear deformation, etc.) cause energy dissipation and can thus counteract crack formation.



Oben: Produktion von Modulen für Brennstoffzellen-Stacks / Above: Production of modules for fuel cell stacks | Photo: ElringKlinger

Links: Spritzgegossene Bipolarplatte, Wärmetauscher-ring und Batteriegehäuse aus einer hochgefüllten Graphitverbindung / Left: Injection-moulded bipolar plate, heat exchanger ring and battery housing made of a highly filled graphite compound | Graphics: Eisenhuth GmbH & Co. KG





Links: Gewickelter Typ-IV Druckbehälter /
Left: Type-IV pressure vessel
Unten: Erfahrungsaustausch auf der Präsenz-
veranstaltung zum Abschluss der ersten Studien-
phase / Below: Knowledge sharing during the
in-person-event at the end of the first study phase

Partner der Konsortialstudie diskutieren Technologien, Komponenten und Materialien für die zukünftige H₂-Wirtschaft / *Partners of the consortial study discuss technologies, components and materials for the future H₂ economy of plastics*

Das IKV beantwortet in seiner H₂-Studie gemeinsam mit Industriepartnern die Fragestellung, wie Materialsysteme zu zukunftsorientierten Wasserstofftechnologien beitragen können, denn die weitreichende Implementierung einer H₂-Infrastruktur wird durch hohe Systemkosten und – im Vergleich zu batterieelektrischen Technologien – geringere Wirkungsgrade erschwert. Signifikante Effizienzsteigerungen bei Erzeugung, Transport und Umwandlung von Wasserstoff können nur durch Innovationen bei Materialien und korrespondierenden Verarbeitungstechnologien erreicht werden. Die Partner der gemeinsamen Studie nutzten die Möglichkeit zum Netzwerken, um mit anderen Industrieteilnehmern die Marktchancen der H₂-Wirtschaft für ihre Materialien, Prozesse, Anlagen und Dienstleistungen zu erörtern und Partnerschaften in diesen aufstrebenden Märkten zu diskutieren.

Die erste Phase der Studie wurde im Februar 2022 mit einer Marktanalyse inkl. der Erarbeitung von 41 Submärkten erfolgreich abgeschlossen. Aufbauend auf der Auswahl der 25 relevantesten Märkte durch die Studienpartner fokussierte die zweite Phase die Technologien, Systemkonfigurationen, Komponenten und Materialien von der Gewinnung bis zur Nutzung von Wasserstoff. In Kleingruppen wurden mehr als 50 Technologie- und Systemkonfigurationen sowie mehr als 60 Komponenten diskutiert. Der Fokus lag dabei auf einer detaillierten Analyse von Anwendungsfeldern, Funktionsweisen, technologischen Herausforderungen sowie TRLs. Eine Vielzahl bestehender Kunststoffanwendungen und Potenziale für zukünftige Implementierungen konnten bereits identifiziert

werden. So wird für Offshore-Pipeline-Systeme bereits heute auf thermoplastische faserverstärkte Rohre gesetzt, die aufgrund ihrer elastischen Eigenschaften signifikant engere Biegeradien als metallische Alternativen ermöglichen und folglich besser aufgerollt und per Schiff an ihre Bestimmungsorte transportiert werden können. Hier kommen zum Beispiel Polyethylen, Polyamid oder Polyvinylidenefluorid zum Einsatz. Ihre Anwendung ist in Tiefen von über 2000 m mit Betriebsdrücken von mehreren hundert Bar möglich.

Auch in Polymerelektrolytbrennstoffzellen gehen Kunststoffanwendungen weit über die eigentliche Membran hinaus. So wird als Alternative zu metallischen Bipolarplatten, die Fertigung dieser im Spritzgussverfahren auf der Basis von hochgefüllten Thermoplasten, wie PP, PPS, PVDF, untersucht. Zur Steigerung der Wärme- und elektrischen Leitfähigkeit wird Graphit als Füllstoff mit bis zu 80 gew. % zugegeben. Die Vorteile kunststoffbasierter Bipolarplatten sind z. B. eine erhöhte Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit sowie ein geringeres Gewicht. Weitere Anwendungsbeispiele sind Kautschukdichtungen oder Gehäuseelemente. In allen Fällen bieten Kunststoffe den Vorteil, dass sie anders als viele Metalle keiner Wasserstoffversprödung unterliegen, da Wasserstoff in Kunststoffen molekular diffundiert und nicht dissoziiert. Allerdings weisen Kunststoffe deutlich höhere Permeationsraten auf, sodass größere Wasserstoffverluste zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus können neben anderen Kontaminationen ionische Verbindungen durch den H₂-Strom ausgespült und zur Brennstoffzelle transportiert werden, wo sie die

aktiven Zentren der Katalysatorschicht besetzen und folglich die Leistung der Brennstoffzelle negativ beeinflussen.

In der dritten Phase der H₂ Studie soll eine detaillierte Betrachtung der Teilsysteme und Komponenten auf Basis einer Potenzialabschätzung sowie einer Abstimmung zur Identifizierung des Interesses der Studienteilnehmer erfolgen. Neben der Ermittlung von anwendungsspezifischen Anforderungen werden Einsatzpotenziale von kunststoffbasierten Materialtechnologien überprüft. Abschließend sollen Konzeptstudien zur Substitution bestehender Werkstoffe durch Kunststoffe unter Berücksichtigung der Auslegung der Kunststoffsysteme, der Bauteilgestaltung sowie der Fertigungstechnologien und unter technologischen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten entwickelt werden.

In its H₂ study, the IKV, together with industrial partners, answers the question of how material systems can contribute to future-oriented hydrogen technologies, because the extensive implementation of an H₂ infrastructure is made more difficult by high system costs and – compared to battery-electric technologies – lower efficiencies. Significant increases in efficiency in the production, transport and conversion of hydrogen can only be achieved through innovations in materials and corresponding processing technologies. The partners in the joint study used the networking opportunity to discuss the market opportunities of the H₂ economy for their materials, processes, equipment and services with other industry participants and to discuss partnerships in these emerging markets.

The first phase of the study was successfully completed in February 2022 with a market analysis including the development of 41 sub-markets. Based on the selection of the 25 most relevant markets by the study partners, the second phase focused on the technologies, system configurations, components and materials from the production to the use of hydrogen. These technology segments were presented to the 35 participants in a face-to-face event on June 22, 2022 on almost 500 slides. More than 50 technology and system configurations and more than 60 components were discussed in small groups. The focus was on a detailed analysis of application

fields, functionalities, technological challenges and TRLs. A large number of existing plastic applications and potential for future implementations have already been identified. For example, thermoplastic fiber-reinforced pipes are already being used for offshore pipeline systems, which, due to their elastic properties, enable significantly tighter bending radii than metal alternatives and are therefore easier to roll up and transport to their destinations by ship. Here, for example, polyethylene, polyamide or polyvinylidene fluoride are used. They can be used at depths of more than 2000 m with operating pressures of several hundred bars.

In polymer electrolyte fuel cells, too, plastic applications go far beyond the actual membrane. As an alternative to metallic bipolar plates, the production of these in the injection molding process on the basis of highly filled thermoplastics such as PP, PPS, PVDF is being investigated. To increase the thermal and electrical conductivity, graphite is used as a filler with up to 80 wt. % added. The advantages of plastic-based bipolar plates are e.g. increased corrosion and chemical resistance and lower weight. Other application examples are rubber seals or housing elements. In all cases, plastics offer the advantage that, unlike many metals, they are not subject to hydrogen embrittlement, since hydrogen diffuses molecularly in plastics and does not dissociate. However, plastics have significantly higher permeation rates, so greater hydrogen losses must be taken into account. In addition, among other contaminants, ionic compounds can be scavenged by the H₂ flow and transported to the fuel cell, where they occupy the active sites of the catalyst layer and consequently adversely affect the fuel cell performance.

In the third phase of the H₂ study, a detailed consideration of the subsystems and components should take place on the basis of an assessment of potential and a vote to identify the interest of the study participants. In addition to determining application-specific requirements, the application potential of plastic-based material technologies is being examined. Finally, concept studies for the substitution of existing materials by plastics are to be developed, taking into account the design of the plastic systems, the component design and the manufacturing technologies and under technological and economic aspects.

Möchten Sie dem Netzwerk beitreten?

Zu Möglichkeiten der Teilnahme beraten wir Sie gern:
H2@ikv.rwth-aachen.de, Tel.: +49 241 80 96960

Would you like to join the network?

We will be happy to advise you on the possibilities of participation:
H2@ikv.rwth-aachen.de, Tel.: +49 241 80 96960

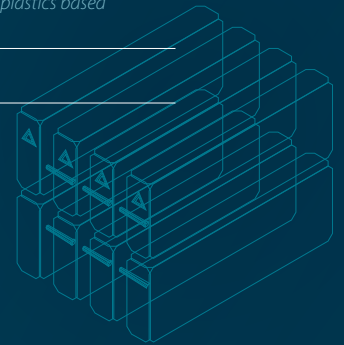


Digitaler Workshop am 15.09.22: Potenziale für Kunststoffmaterialien in der Wasserstoffwirtschaft /

Digitaler Workshop at 15.09.22: Potentials for Plastic Materials in the Hydrogen Economy

PROGRAMM / PROGRAMME

9.00	Begrüßung und Einführung durch das IKV / Welcome and Introduction by IKV
9.05	Kurze Vorstellung des Referenten und der Firma Neuman & Esser und wie sie in die H ₂ -Wertschöpfungskette eingebunden sind <i>Brief self-introduction of the speaker and company Neuman & Esser and how they are involved in the H₂ value chain</i>
9.10	Beschreibung des Systems und der Komponenten unter Berücksichtigung bestehender Herausforderungen und potenzieller Trends für die ausgewählte H ₂ -Technologie. <i>Description of the system and components, addressing existing challenges and potential trends for the selected H₂ technology. (Neuman & Esser)</i>
9.30	Frage-Antwort-Block mit anschließender Diskussion über das Potenzial und die Herausforderungen der Verwendung von Kunststoffen anhand von Leitfragen / Q&A block followed by discussion on the potential and challenges of using plastics based on guiding question
10.45	Kurze Zusammenfassung der Diskussion / Short summary of the discussion



Markt- und Technologiestudie: Potenziale für Kunststoffmaterialien in der Wasserstoffwirtschaft /

Market and Technology Study: Potentials for Plastic Materials in the Hydrogen Economy



PHASE 1: Detaillierte Betrachtung der Teilsysteme/Komponenten auf der Grundlage einer Potenzialabschätzung und der aktuellen Abstimmungsergebnisse zur Identifizierung der Teilnehmerinteressen / *Detailed consideration of subsystems/components based on an assessment of potential and the current voting results for the identification of interest by the participants*

PHASE 2: Ermittlung der anwendungsspezifischen Anforderungen und Überprüfung der Verwendbarkeit von polymeren Werkstoffen / *Determination of the application-specific requirements and review of the usability of polymeric materials*

PHASE 3: Durchführung von Konzeptstudien zur Substitution bestehender Werkstoffe durch Kunststoffe mit erfolgreicher Identifizierung von Anwendungsfällen (hinsichtlich Anforderungen an Kunststoffsysteme, Fertigungstechnologie, Bauteilgestaltung) / *Carrying out concept studies for the substitution of existing materials by plastics with successful identification of application cases (with regard to requirements on plastic systems, production technology, component design)*

Save the date: Ergebnispräsentation am 15.11.22

Final Results Meeting at 15.11.22